



## DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIEE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIERE DE BREVETS (PCT)

(51) Classification internationale des brevets <sup>7</sup> : <b>G01N 23/04, G01V 5/00</b>		A2	(11) Numéro de publication internationale: <b>WO 00/43760</b> (43) Date de publication internationale: 27 juillet 2000 (27.07.00)
<p>(21) Numéro de la demande internationale: <b>PCT/FR00/00117</b></p> <p>(22) Date de dépôt international: 20 janvier 2000 (20.01.00)</p> <p>(30) Données relatives à la priorité: 99/00562 20 janvier 1999 (20.01.99) FR</p> <p>(71) Déposant (<i>pour tous les Etats désignés sauf US</i>): HEIMANN SYSTEMS (SOCIETE ANONYME) [FR/FR]; 45, rue d'Antony - Silic 171, F-94150 Rungis (FR).</p> <p>(72) Inventeurs; et (75) Inventeurs/Déposants (<i>US seulement</i>): PERION, Didier [FR/FR]; 48, rue Vergniaud, F-75013 Paris (FR). MARTIN, Thierry [FR/FR]; 43, rue Emile Zola, F-94260 Fresnes (FR). MAITREJEAN, Serge [FR/FR]; 202 bd de Charonne, F-75020 Paris (FR). FRANK, Andreas [DE/DE]; Danziger Strasse 9, D-36304 Alsfeld (DE). SCHALL, Patricia [DE/DE]; Kranichsteinerstrasse 71, D-64289 Darmstadt (DE).</p> <p>(74) Mandataire: SERIN, Jean-Pierre; Cabinet Loyer, 78, avenue Raymond Poincaré, F-75116 Paris (FR).</p>		<p>(81) Etats désignés: CN, JP, RU, US, brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Publiée <i>Sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport.</i></p>	
<p>(54) Title: SYSTEM FOR DIFFERENTIATING BETWEEN ORGANIC AND INORGANIC SUBSTANCES</p> <p>(54) Titre: SYSTEME DE DISCRIMINATION DE MATIERES ORGANIQUES ET INORGANIQUES</p> <p>(57) Abstract</p> <p>The invention concerns a device for differentiating between organic and inorganic elements comprising a high energy photon source, a device for displacing objects to be inspected and an acquisition system consisting of a line of detectors designed to interact with the photons which have traversed through the object to be inspected. It comprises a filtering system (2) designed to interpose a filter between a high energy photon source (1) and the object to be inspected, a computer-aided device controlling and synchronising (5) the filtering (2) and the acquisition (4) systems and a display system (6), the computer-aided system (5) elaborating, on the basis of the signals of two measurements performed with different filters the atomic number Z of the material traversed in the different zones of the object (7) and producing an image of the object by attributing a code to said zones according to their organic or inorganic nature.</p> <p>(57) Abrégé</p> <p>Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques comprenant une source de photons de haute énergie, un dispositif de déplacement des objets à inspecter et un système d'acquisition constitué par une ligne de détecteurs destinés à interagir avec les photons ayant traversé l'objet à inspecter. Il comporte un système de filtration (2) destiné à interposer un filtre entre une source (1) de photons de haute énergie et l'objet (7) à inspecter, un dispositif informatique de commande et de synchronisation (5) des systèmes de filtration (2) et d'acquisition (4) et un système de visualisation (6), le dispositif informatique (5) établissant, à partir des signaux de deux mesures effectuées avec des filtres différents le numéro atomique Z de la matière traversée dans les différentes zones de l'objet (7) et élaborant une image de l'objet en affectant un code à ces zones selon leur nature organique ou inorganique.</p>			

**UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION**

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publient des demandes internationales en vertu du PCT.

AL	Albanie	ES	Espagne	LS	Lesotho	SI	Slovénie
AM	Arménie	FI	Finlande	LT	Lituanie	SK	Slovaquie
AT	Autriche	FR	France	LU	Luxembourg	SN	Sénégal
AU	Australie	GA	Gabon	LV	Lettonie	SZ	Swaziland
AZ	Azerbaïdjan	GB	Royaume-Uni	MC	Monaco	TD	Tchad
BA	Bosnie-Herzégovine	GE	Géorgie	MD	République de Moldova	TG	Togo
BB	Barbade	GH	Ghana	MG	Madagascar	TJ	Tadjikistan
BE	Belgique	GN	Guinée	MK	Ex-République yougoslave de Macédoine	TM	Turkménistan
BF	Burkina Faso	GR	Grèce	ML	Mali	TR	Turquie
BG	Bulgarie	HU	Hongrie	MN	Mongolie	TT	Trinité-et-Tobago
BJ	Bénin	IE	Irlande	MR	Mauritanie	UA	Ukraine
BR	Brésil	IL	Israël	MW	Malawi	UG	Ouganda
BY	Bélarus	IS	Islande	MX	Mexique	US	Etats-Unis d'Amérique
CA	Canada	IT	Italie	NE	Niger	UZ	Ouzbékistan
CF	République centrafricaine	JP	Japon	NL	Pays-Bas	VN	Viet Nam
CG	Congo	KE	Kenya	NO	Norvège	YU	Yougoslavie
CH	Suisse	KG	Kirghizistan	NZ	Nouvelle-Zélande	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	République populaire démocratique de Corée	PL	Pologne		
CM	Cameroun	KR	République de Corée	PT	Portugal		
CN	Chine	KZ	Kazakhstan	RO	Roumanie		
CU	Cuba	LC	Sainte-Lucie	RU	Fédération de Russie		
CZ	République tchèque	LI	Liechtenstein	SD	Soudan		
DE	Allemagne	LK	Sri Lanka	SE	Suède		
DK	Danemark	LR	Libéria	SG	Singapour		

Système de discrimination de matières organiques et inorganiques

L'invention concerne un système de discrimination de matières organiques et inorganiques en utilisant un rayonnement électromagnétique (X ou  $\gamma$ ), et le cas 5 échéant neutronique, à haute énergie, pour l'inspection d'objets volumineux, notamment du fret de camions, de palettes ou de conteneurs pour des besoins de politique douanière ou de sécurité.

Des systèmes de discrimination de matières organiques et inorganiques sont déjà couramment utilisés, en particulier dans les ports et les aéroports, pour détecter la 10 présence de drogues, d'armes ou d'autres marchandises interdites ou réglementées dans des bagages. On utilise alors des rayonnements de faibles énergies (<150KeV). Mais les systèmes utilisés actuellement ne font pas de discrimination à hautes énergies (>1 MeV).

Le procédé utilisé consiste à bombarder l'objet à inspecter au moyen d'un 15 rayonnement électromagnétique (X ou  $\gamma$ ) ou de neutrons. Un moyen d'obtenir ce rayonnement est d'utiliser des particules chargées de haute énergie qui sont ralenties en traversant une cible et donnent naissance à un rayonnement de freinage constitué de photons. On peut aussi utiliser des sources radioactives.

Les rayonnements sont issus, soit de sources radioactives, soit de l'interaction de 20 particules chargées (électrons par exemple) avec la matière.

L'utilisation de ces particules chargées implique, dans le cas d'objets de grande taille à inspecter, de les accélérer jusqu'à obtenir des photons ayant des énergies supérieures à 1 MeV. Les photons traversent l'objet à inspecter ou sont en partie diffusés ou carrément absorbés. Les photons ayant traversé l'objet interagissent avec 25 des détecteurs.

Un dispositif utilisé (représenté sur la figure 1) consiste en une source 1 de rayons X disposée au bord de la voie empruntée par l'objet 7 à inspecter, et en une série de détecteurs 4 alignés verticalement, de l'autre côté de la voie par rapport à la source. L'émission de photons dans le plan où se trouve la ligne de détecteurs associée au 30 déplacement de l'objet, permet d'obtenir un signal d'information liée au nombre de ces photons et leur énergie. Ce signal est transmis au système d'exploitation 5 qui

produit une image en transmission à deux dimensions de la quantité de photons qui ont interagi avec le contenu de l'objet à inspecter.

En raison des lois régissant les processus d'interaction photon/matière, chaque pixel de l'image en transmission obtenue exprime essentiellement l'épaisseur plus ou moins grande et la densité plus ou moins élevée de la matière traversée. A densité constante, plus l'épaisseur est importante, plus le signal détecté est faible. Donc, dans une image exprimée en niveaux de gris avec des pixels blancs pour un signal maximum et noirs pour un signal minimum, plus le signal est faible, plus le pixel est sombre. De même, à épaisseur constante, plus la densité est élevée plus le signal est faible et le pixel sombre.

Toutefois, vis à vis de ces rayonnements X ou  $\gamma$ , la matière ne se caractérise pas seulement par les deux paramètres qui sont l'épaisseur  $ep$  et la densité  $\rho$ , mais aussi par un troisième qui est le numéro atomique  $Z$ . En effet, la transmission s'exprime par :

$$Tr(E) = \frac{I(E)}{I_0(E)} = \exp(-\frac{\mu(E, Z)}{\rho} \cdot \rho \cdot ep)$$

où  $E$  est l'énergie,  $\mu$  le coefficient linéaire d'atténuation,  $I_0(E)$  est l'intensité du spectre avant l'objet à inspecter et  $I(E)$  l'intensité du spectre après l'objet et  $\mu/\rho$  le coefficient massique d'atténuation linéaire qui, pour une énergie donnée, ne dépend que du numéro atomique  $Z$  uniquement.

Avec des rayons X de basses énergies (autour de 100 KeV), il est assez facile de discriminer les matières constituant les corps traversés de petite taille. Par contre, le problème se complique avec des corps de grande taille qui ne peuvent être inspectés qu'avec un rayonnement de hautes énergies (au-delà de 1 MeV)

Les systèmes de contrôle d'objets volumineux aux rayons X de hautes énergies utilisés jusqu'ici fournissent une image dont chaque pixel symbolise, par un niveau de gris ou de la fausse couleur, la transmission  $Tr(E)$  ou son logarithme népérien  $\ln(Tr(E))$ . Mais ils présentent un inconvénient, à savoir que l'utilisateur du dispositif ne peut affirmer si l'image montre par exemple 10 cm de fer ou 35 cm de Téflon. Dans la majorité des cas, il ne peut donc identifier la matière constituant le corps représenté.

Une tentative de solution à ce problème a été apportée par la demande de brevet internationale WO93/14419. Le système revendiqué dans ce document permet de faire de la discrimination de matière avec un rayonnement de hautes énergies. Il utilise pour cela les différences de distribution spatiale des effets Compton et de 5 création de paires. Aux hautes énergies, l'effet Compton conduira à une émission de photon vers l'avant (même direction que le rayonnement), tandis que l'émission de paires conduira à une émission isotrope de photons (toutes directions). Les détecteurs sont constitués par des scintillateurs disposés hors du faisceau qui, de ce fait, ne détectent que des photons diffusés. Le détecteur disposé le plus près de la source, 10 c'est à dire sur le côté et à l'arrière de l'objet à inspecter, va interagir principalement avec des photons issus de la création de paires, tandis que le détecteur le plus éloigné de la source, c'est à dire situé sur l'autre côté et vers l'avant de l'objet à inspecter, va interagir avec les photons Compton. Les photons diffusés sont issus d'interactions se produisant dans un convertisseur. La comparaison des signaux fournis par les 15 détecteurs permet de faire de la discrimination organique/inorganique en mesurant comment se déforme le spectre lors de l'interaction avec un objet à inspecter.

Ce système présente plusieurs inconvénients :

en raison de l'utilisation d'un convertisseur, c'est à dire un matériau lourd qui permet aux photons de subir des interactions pour produire des photons diffusés, la dose 20 d'irradiation pour obtenir un bon fonctionnement est beaucoup plus élevée que les doses habituelles ; ce procédé est complexe et coûteux ;  
enfin, du fait qu'il travaille au niveau des détecteurs il est très sensible à la diaphonie, qui dégrade considérablement la qualité de l'image de discrimination, et aux défauts d'alignement.

25 L'invention vise à éliminer ces inconvénients et est basée sur les constatations suivantes.

Lorsque les photons ont une énergie supérieure à 1,022 MeV, il peut se produire deux types d'interaction avec la matière :

- la diffusion incohérente  
30 après une interaction avec un électron, le photon est réémis avec une énergie plus faible ; c'est ce que l'on appelle l'effet Compton.

- la production de paires

le photon s'annihile dans le champ coulombien de l'atome et produit des paires électron-positron; le positron s'annihile dès qu'il rencontre un autre électron et produit deux photons de 511 KeV.

5 A ces valeurs d'énergie, la diffusion incohérente (effet Compton) est indépendante du numéro atomique Z, alors que la production de paires a comme loi d'échelle :

$$\frac{Z^2}{A} \approx Z$$

avec A la masse atomique.

Seul l'ajout du processus de production de paires permet de faire de la discrimination 10 en Z. Les probabilités d'obtenir de tels processus prennent des valeurs non négligeables à partir d'une énergie de 4 MeV et varient selon la matière.

A titre d'exemple, lorsqu'il y a une interaction avec un photon dont l'énergie est de 4 MeV, il y a 6% de chances que ce soit pour une production de paires dans de l'azote, 10% dans de l'aluminium et 18% dans du fer. Cette proportion croît avec l'énergie 15 pour tendre vers 100% aux très hautes énergies (80% à 100 MeV). Ce type de comportement montre qu'il devrait être, théoriquement, d'autant plus aisés de faire de la discrimination que les énergies mises en jeu seront plus importantes.

D'autre part, l'interaction des neutrons avec la matière peut être également utilisée. C'est essentiellement de la diffusion élastique. La perte maximale d'énergie d'un 20 neutron d'énergie initiale  $E_0$  après collision avec un noyau de nombre de masse A est :

$$(\Delta E)_{\max} = E_0 \cdot (1 - \alpha)$$

$$\text{avec } \alpha = \left( \frac{1 - A}{1 + A} \right)^2$$

Pour A=1 ( $\alpha=0$ ), le neutron transfère toute son énergie à un proton. Ceci explique 25 pourquoi les matériaux à fort taux d'hydrogène sont de bons absorbants de neutrons. Exemples, la paraffine, le polyéthylène, ...

La différence entre les interactions neutron-matière et X-matière, ou  $\gamma$ -matière, est suffisamment significative pour apporter une information complémentaire. Alors que la transmission des rayons X ou  $\gamma$  dépend du numéro atomique Z de l'objet à inspecter, les neutrons sont atténués par quelques éléments à faible Z. A titre 5 d'exemple, les matières organiques sont visibles en radiographie neutronique parce qu'ils contiennent un taux élevé d'hydrogène, tandis que l'aluminium et le plomb y sont transparents.

Numéro atomique Z	faible	élevé
X, $\gamma$	faible absorption	forte absorption
Neutrons	forte absorption	faible absorption

10 La courbe montrée sur la figure 7 illustre parfaitement la séparation des éléments. La transmission du faisceau de photons  $T_\gamma = e^{-\mu_{\gamma} x}$  en fonction de la transmission du faisceau de neutrons  $T_N = e^{-\mu_N x}$  à travers l'objet à inspecter permet l'identification de celui-ci quelle que soit la classification des neutrons, thermique (c'est à dire lent) (0,025 eV) ou rapide (5 MeV).

15 Il résulte de ce qui précède que deux données seront nécessaires et suffisantes pour faire de la discrimination de numéros atomiques :le nombre de photons ou de neutrons ayant traversé l'objet à inspecter et leur énergie.

Dans le cas où l'on n'utilise que des rayonnements X, ou  $\gamma$ , l'une d'elles résulte d'une 20 gamme d'énergies où il y a préférentiellement de la diffusion Compton et l'autre d'une gamme d'énergies où il y a préférentiellement de la production de paires. Ou encore les deux gammes sont bien disjointes en énergie et permettent préférentiellement de la création de paires.

Dans le cas où l'on utilise des neutrons, on va pouvoir visualiser les matériaux à 25 faible numéro atomique.

L'objet de l'invention sera donc la définition de procédés et de dispositifs permettant d'obtenir ces deux données :

- soit par deux mesures distinctes effectuées successivement dans le temps afin de produire deux spectres de photons.

- soit par deux mesures effectuées simultanément, ou presque, afin d'effectuer la discrimination par spectroscopie basse résolution,
- soit par deux mesures afin d'effectuer la discrimination par l'association neutrographie (Z faible) et gammagraphie (Z élevé).

5 L'invention sera mieux comprise au moyen d'exemples de réalisation représentés sur le dessin annexé dans lequel :

La figure 1 montre le principe de balayage d'un objet à inspecter selon l'art antérieur,

10 La figure 2 montre le principe de balayage d'un objet à inspecter, avec un rayonnement filtré, pour la discrimination de numéros atomiques, selon l'invention,

La figure 3 montre les spectres (l'intensité  $N(E)$  en fonction de l'énergie ( $E$ )) obtenus avec et sans filtration,

La figure 4 montre le cylindre porte-filtre du système selon l'invention,

15 Les figures 5a et 5b montrent le déroulement de l'acquisition avec le filtre cylindrique tournant,

La figure 6 montre le diagramme des épaisseurs d'objets pour un  $Z$  donné, obtenu en intégrant les courbes des spectres filtré (ordonnées) et non filtré (abscisses) à chaque point de mesure ;

20 La figure 7 montre la courbe représentant la transmission du faisceau de photons en fonction de la transmission du faisceau de neutrons ;

La figure 8 montre l'empilement des amplitudes des signaux mesurés à la sortie du détecteur ;

25 La figure 9 montre la différence de volume utile des détecteurs entre la détection par filtrage et la spectroscopie basse résolution ;

La figure 10 montre le schéma de principe d'une chaîne d'acquisition haute résolution usuelle ;

La figure 11 montre une chaîne d'acquisition basse résolution de principe selon l'invention ;

30 La figure 12 montre la prédominance des interactions rayonnement/matière pour les différents  $Z$  ;

La figure 13 montre la section efficace de production des neutrons dans les cibles de tungstène  $W(\gamma,n)$ , à gauche et de plomb  $Pb(\gamma,n)$ , à droite ;

La figure 14 montre le dispositif de mise en œuvre du procédé de discrimination selon le troisième mode de réalisation de l'invention.

La figure 15 montre la méthode d'identification en Z avec des neutrons rapides.

5 Première forme de réalisation de l'invention, discrimination par système de filtration.

Dans le premier cas cité ci-dessus, on va donc effectuer les deux mesures successivement afin de produire deux spectres de photons. Les spectres ayant des formes différentes en fonction de l'énergie, l'un au moins de ces deux spectres 10 produit des processus de création de paires. La comparaison des résultats des interactions des photons de ces deux spectres permet de distinguer les numéros atomiques.

15 Selon cette première forme de réalisation de l'invention, le procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques par un rayonnement électromagnétique (X ou  $\gamma$ ) à hautes énergies, est caractérisé en ce que pour chaque zone examinée de l'objet,

20 on effectue successivement, à partir d'au moins une source de rayonnement d'énergies élevées, deux mesures révélatrices du nombre de photons, ayant chaque fois traversé l'objet et de leur énergie, la seconde mesure au moins étant effectuées avec interposition d'un filtre entre la source et l'objet à inspecter afin d'augmenter l'énergie des photons,

on élabore après chaque mesure un signal représentatif du spectre des photons ayant traversé l'objet,

25 on intègre ces signaux pour obtenir une paire de valeurs d'intégration dont le rapport, pour chaque zone de l'objet, est représentatif du numéro atomique Z de l'élément principal constituant l'objet traversé par les photons et

on élabore à partir de ces signaux une image sur laquelle la matière constituant l'objet traversé, ou une zone de celui-ci, et l'épaisseur ou la densité du corps constitué par cette matière sont indiquées par un code.

Selon l'invention, les deux mesures sont effectuées au moyen d'une même source 30 électromagnétique à hautes énergies entre laquelle et l'objet à inspecter on intercale successivement un premier filtre puis un second filtre qui augmente l'énergie des photons de la source.

Le premier filtre peut être constitué par une matière filtrante ou par aucune matière filtrante. Le second filtre est constitué par exemple par du bore et de préférence 80 g/cm<sup>2</sup> de bore.

Selon l'invention, le code utilisé pour caractériser la matière est un code de couleurs, 5 chaque couleur étant spécifique d'une matière. Le code utilisé pour caractériser l'épaisseur ou la densité est constitué par l'intensité de la couleur spécifique de la matière.

On a représenté schématiquement sur la figure 2 un dispositif selon l'invention

Ce dispositif comporte une source de photons de hautes énergies 1, un système de 10 filtration 2, un dispositif de déplacement 3 des objets 7 à inspecter, une ligne de détecteurs 4 reliés à un dispositif informatique de commande et de synchronisation 5 des systèmes de filtration et d'acquisition et un dispositif de visualisation 6.

La source de photons 1 peut être électrique ou radioactive. On peut par exemple 15 utiliser un accélérateur amenant les électrons à une énergie de 10 MeV qui vont interagir dans du tungstène afin de produire un spectre de rayonnement X (ces électrons entrent en collision avec une cible et produisent les photons nécessaires). On peut aussi par exemple utiliser du gallium 64 qui émet des photons de 0,8, 0,9, 1, 1,3, 1,4, 2,2, 2,4 et 3,4 MeV.

Lorsque les photons, émis à partir de l'une quelconque de ces sources 1, ont traversé 20 l'objet à inspecter 7 (par exemple un camion), qui est déplacé entre la source 1 et les détecteurs 4 au moyen du dispositif de déplacement 3, et ont interagi avec la ligne de détecteurs 4, le dispositif peut définir deux spectres. Ces spectres sont deux spectres filtrés ou, par exemple, l'un sans filtration et l'autre avec interposition d'un filtre 2 entre la source et l'objet à inspecter. Ces spectres sont montrés à la figure 3. On peut 25 par exemple utiliser un filtre de 80 g/cm<sup>2</sup> de bore qui favorise les hautes énergies. Grâce à cela, le spectre du rayonnement non filtré se distingue nettement du spectre filtré.

La mise en œuvre de la filtration peut être faite au moyen d'un cylindre rotatif dont 30 l'axe de rotation est parallèle au plan du faisceau de photons. Comme le montre la figure 4, le cylindre est divisé dans le sens longitudinal en secteurs constitués ou non de matière de filtrage.

L'acquisition des photons par les détecteurs 4 est synchronisée avec la position en rotation du cylindre, chaque position en rotation correspondant à un secteur, donc un filtre particulier.

Selon l'exemple représenté à la figure 5, le cylindre est divisé en quatre secteurs dont 5 deux, diamétralement opposés, ne constituent pas un filtre et les deux autres également diamétralement opposés opposent au faisceau de photons  $80\text{g/cm}^2$  de bore.

L'acquisition commence par exemple lorsque le faisceau de photons passe par les secteurs non filtrants. Comme le montre la figure 5a le spectre est le même avant et

$$G_0(x, y) = \int I_0(E) \cdot Tr(E, x, y) \cdot Rep(E) \cdot dE$$

10 après le cylindre. Le résultat de la mesure est :

Rep(E) étant la réponse du détecteur lorsqu'il interagit avec un photon d'énergie E et x et y les positions cartésiennes indiquant le lieu où se fait la mesure.

Puis, le cylindre, entraîné par son moteur commandé par le dispositif de commande 15 et de synchronisation 5, passe dans une position où les photons traversent le filtre de bore. Le résultat de la mesure est alors :

$$G_1(x, y) = \int I_0(E) \cdot Tr_{filtre}(E) \cdot Tr(E, x, y) \cdot Rep(E) \cdot dE$$

Tr<sub>filtre</sub>(E) étant la transmission du filtre.

Le rapport  $\frac{G_1(x, y)}{G_0(x, y)}$  des deux mesures ou l'expression de G<sub>1</sub>(x,y) en fonction de 20 G<sub>0</sub>(x,y), permet de distinguer les numéros atomiques Z de l'objet inspecté et d'en faire une image en deux dimensions, avec des nuances de gris et/ou des fausses couleurs.

A partir du moment où le numéro atomique Z a été déterminé, les deux mesures vont être exploitées par l'électronique 5 pour donner une image. La première mesure, 25 effectuée sans le filtre, va donner la forme de l'objet détecté et le niveau de gris ou de fausse couleur en fonction à la fois de sa densité, de son épaisseur et du numéro

atomique de la matière. En y associant la deuxième mesure, on définit une couleur, fonction de la valeur de Z pour cette matière.

L'exploitation des spectres montrés sur la figure 3 s'effectue par intégration des courbes, ou par spectroscopie, pour chaque acquisition de photons par un des 5 détecteurs 4 de la figure 2.

Sur la figure 6 on a représenté un diagramme dont les abscisses représentent les valeurs d'intégration du spectre non filtré pour chaque point de mesure et les ordonnées la valeur d'intégration du spectre filtré aux mêmes points de mesure. Si le point ainsi obtenu est situé sur la courbe inférieure ou au-dessous, c'est à dire des 10 valeurs élevées de Z, les éléments détectés sont inorganiques, de faible épaisseur dans la zone supérieure et de forte épaisseur dans la zone inférieure du diagramme. Si par contre il se situe sur la courbe supérieure ou au-dessus, c'est à dire des Z faibles, il s'agit alors d'un corps organique.

On obtient ainsi une image dans laquelle des zones colorées avec une intensité 15 variable vont indiquer la présence d'un composant plus ou moins dense ou plus ou moins épais et de numéro atomique Z plus ou moins élevé.

On a décrit ci-dessus un procédé et un dispositif utilisant une seule source de rayonnement entre laquelle et l'objet à inspecter, on intercale un filtre différent pour chacune des deux mesures, voire pour la première mesure pas de filtre du tout. 20 On peut également envisager d'utiliser deux sources différentes dont une au moins, la seconde, est filtrée, sources que l'on présenterait successivement devant l'objet pour faire les deux mesures, de la même manière que l'on présente successivement des filtres devant une source unique fixe dans l'exemple ci-dessus.

25 Deuxième forme de réalisation de l'invention, discrimination par spectroscopie basse résolution.

La spectroscopie a pour objet de classer des particules de nature donnée en fonction de leur énergie. On utilise la variation, en fonction de l'énergie, de la hauteur 30 d'impulsion (qui dépend de l'énergie d'origine du photon) du détecteur. Le cas idéal est celui où la hauteur est proportionnelle à l'énergie perdue par la particule. Cette

condition est remplie dans les détecteurs proportionnels. Si la particule est arrêtée dans le volume sensible du détecteur, la hauteur est proportionnelle à son énergie à l'entrée du détecteur. Une telle condition est réalisée dans les jonctions PN, les semi-conducteurs et les scintillateurs. Dans le cas du scintillateur d'iodure de césium activé au thallium, CsI(Tl), le pouvoir de résolution, rapport  $\Delta E/E$  de la largeur totale à mi-hauteur de la distribution à l'énergie moyenne correspondante est au mieux de 5% à 10%. Dans le cas des diodes PIN de germanium (Ge) et du tellure de cadmium (CdTe), le pouvoir de résolution atteint :

A 122 keV	Ge	0,3%	CdTe	3,1%
A 662 keV	Ge	0,13%	CdTe	1,1%

On aura donc tendance à privilégier les semi-conducteurs pour effectuer les mesures par spectroscopie X.

La réponse du détecteur n'est jamais instantanée, elle s'étend sur une certaine durée et présente une constante de temps  $\tau$ . Si ce détecteur est soumis à une excitation de fréquence  $1/T$  de l'ordre de  $1/\tau$ , alors il y a recouvrement des signaux de sortie, c'est à dire superposition ou empilement des amplitudes des signaux précités (voir figure 8). L'analyse du spectre semble alors incompatible avec les accélérateurs pulsés.

En effet, le cycle utile d'un accélérateur est défini par le rapport entre le temps où le faisceau est présent et le temps total du cycle. Le cycle utile dépend du type d'accélérateur. Il est préférable d'avoir une machine à haut cycle utile car ainsi les particules sont uniformément réparties dans le temps alors qu'un faible cycle utile délivre le même nombre de particules pendant un temps plus court. La discrimination organique/inorganique par spectroscopie à partir des sources pulsées des systèmes de radiographie (cycle utile de  $10^{-3}$ ) ne sera donc envisageable qu'en réduisant le nombre de photons sur les détecteur.

Connaissant cela, l'invention, selon la deuxième forme de réalisation, consiste à effectuer une spectroscopie basse résolution du spectre issu de l'objet inspecté afin de discriminer les matières organiques des inorganiques. Afin de réduire le nombre de photons sur les détecteurs, ceux-ci présentent donc un volume utile plus faible que celui des détecteurs utilisés dans la première forme de réalisation. On a représenté une comparaison de ces détecteurs à la figure 9.

Ces détecteurs sont de préférence des détecteurs au tellure de cadmium (CdTe). Les principaux avantages du tellure de cadmium sont un fonctionnement à température

ambiante et un numéro atomique très élevé ( $Z=48$  à  $52$ ), ce qui le rend très absorbant pour les rayonnement X.

Pour éliminer le risque de superposition ou empilement des amplitudes des signaux de sortie de l'accélérateur, on utilise des détecteurs de petits volume pour mesurer 5 l'énergie des photons. la réduction du volume des détecteurs améliore la résolution spatiale. En principe, celle-ci est plus petite que la taille du pixel de l'image radioscopique.

Une chaîne d'acquisition haute résolution courante est représentée sur la figure 10. Cette chaîne utilise des circuits linéaires chargés d'amplifier, de mettre en forme et de 10 trier du bruit les impulsions délivrées par le détecteur afin de les présenter à terme à un convertisseur analogique/numérique. Le préamplificateur de charge (PA) a pour rôle d'amplifier le signal issu du détecteur avec un bruit minimum ; l'amplificateur (A) amplifie et filtre le signal pré amplifié ; la porte linéaire ou logique de décision (PL) sert à trier les évènements intéressants entre le signal et les bruits du détecteur 15 d'une part et ceux captés par le câble (représenté en pointillé).

Ce type d'électronique permet d'optimiser le rapport signal/bruit mais ralentit le dispositif d'acquisition. Selon l'invention, on propose de remplacer cette chaîne d'acquisition par un unique codeur de charge relié au détecteur (figure 11). Le temps de codage du convertisseur analogique/numérique est fonction de la résolution 20 souhaitée et de la fréquence d'échantillonnage. Le temps mort de l'acquisition sera réduit par la diminution du nombre de bits du codeur et ceci au détriment de la résolution.

Selon ce schéma, le détecteur génère, à partir d'un photon incident d'énergie  $E_0$  détecté, une tension  $V_0$  proportionnelle à  $E_0$ . Sous l'impulsion du photon X (ou  $\gamma$ ) 25 d'énergie  $E_0$ , la capacité C montée en contre-réaction sur l'amplificateur opérationnel intègre les charges débitées par le détecteur. La rapidité de ce dispositif dépend en majeure partie du temps de résolution (tr) au bout duquel le dispositif électronique associé peut enregistrer un nouveau signal. Les intégrateurs de charges rapides et à faible bruit font souvent intervenir des composants discrets. Toutefois, la réduction 30 de la taille des pixels entraîne une multiplication du nombre de voies à traiter et nécessite le développement de circuits intégrés spécifiques tels que des ASICs qui permettent de monter l'électronique analogique sur le détecteur.

La comparaison des interactions rayonnement/matière pour les énergies mesurées par spectroscopie basse résolution, à savoir pour les énergies faibles l'effet Compton et pour les hautes énergie la production de paires, permet de distinguer le numéro atomique effectif Z de l'objet inspecté.

5 Le procédé de détermination de Z en fonction de la prédominance des interactions rayonnement/matière est montré schématiquement à la figure 12 et est réexprimé par la figure 6.

Discrimination organique/inorganique par neutrographie et gammagraphie.

10

Selon une troisième forme de réalisation de l'invention, on va utiliser, outre le flux de photons issu de l'accélérateur, le flux de neutrons qui en sort également pour effectuer la discrimination organique/inorganique.

15 Comme on l'a dit plus haut, la neutrographie va permettre de visualiser les matériaux à faible numéro atomique Z alors que les matériaux à numéro atomique plus élevé vont être décelés par la gammagraphie. La production de photons et de neutrons par l'accélérateur nécessite l'emploi de cibles spécifiques à chacune de ces particules. On va utiliser une combinaison de ces deux cibles ayant chacune un rendement maximum. Bien que le seuil de la réaction photo nucléaire ( $\gamma$ , n) diffère entre une 20 cible de plomb (7 MeV) et une cible de tungstène (8 MeV), l'énergie des photons assurant un rendement optimum de la cible est de 14 MeV dans les deux cas (voir figure 13).

25 L'énergie actuelle des systèmes d'inspection par rayons X à haute énergie n'atteint pas ces résonances.

30 L'invention selon ce troisième mode de réalisation, va utiliser la complémentarité des interactions X-matière et neutron-matière pour effectuer la discrimination organique/inorganique de l'objet à inspecter et cela à partir d'une unique source de rayonnement. Ces neutrons sont produit dans la cible de Bremsstrahlung elle-même ou en intercalant un filtre de production de neutron par exemple de l'Uranium ou un matériau contenant du Deutérium. Ce filtre pouvant être présent une mesure sur deux (figure 2).

Comme le montre la figure 14, les photons et neutrons en provenance de l'accélérateur qui traversent l'objet à inspecter arrivent sur les détecteurs de photons

X et de neutrons. La ligne de détection est constituée par l'association de deux scintillateurs en cascade. Le premier étage 1 est équipé de scintillateurs inorganique pour détecter les photons X et le deuxième étage est équipé de scintillateurs inorganiques, organiques ou aux verres pour détecter les neutrons.

5 Chacun des étages est suivi d'une électronique 3 et 4 respectivement pour le traitement des signaux représentatifs du nombre de photons ou de neutrons détectés dans chaque cas et de leur énergie et d'un système 5 effectuant la discrimination organique/inorganique à partir des signaux traités.

L'atténuation des photons  $Att_\gamma$  et des neutrons  $Att_N$  à travers l'objet à inspecter s'écrit 10 respectivement :

$$Att_\gamma(E) = -\log\left(\frac{I_\gamma(E)}{I_{0\gamma}(E)}\right) = \mu_\gamma x$$

$$Att_N(E) = -\log\left(\frac{I_N(E)}{I_{0N}(E)}\right) = \mu_N x$$

15  $\mu_\gamma$  et  $\mu_N$  étant les coefficients d'atténuation,  $I_{0\gamma, N}(E)$  et  $I_{\gamma, N}(E)$  respectivement les intensités des rayonnement photonique et neutronique avant et après l'objet à inspecter. Les atténuations suivent une fonction continue et proportionnelle au numéro atomique. Le rapport entre l'atténuation des photons et l'atténuation des neutrons s'écrit donc :

$$20 \quad \frac{Att_\gamma(E)}{Att_N(E)} = \frac{\mu_\gamma}{\mu_N}$$

Ce rapport est indépendant de l'épaisseur x de l'objet inspecté. Les tableaux 1 et 2 suivants expriment le rapport des atténuations pour différents éléments connus pour des Z variant de 4 à 82.

Eléments	Z	Att <sub>γ</sub> /Att <sub>N(thermiques)</sub>
H	1	0,0027
Be	4	0,067
B	5	0,00065
C	6	0,162
Al	13	0,89

Zr	40	0,69
Cd	48	0,0024
Ce	58	0,948
Gd	64	0,00019
Pb	82	1,92

Tableau 1 : Rapport des atténuations pour quelques éléments connus avec des neutrons thermiques et des photons de 3 MeV.

L'évolution du rapport des atténuations pour les neutrons thermiques en fonction du numéro atomique Z n'est pas une fonction continue, car 3 des ces éléments, le bore, 5 le cadmium et le gadolinium présentent une section efficace, c'est à dire une probabilité, d'absorption très élevée. Malgré cela, l'identification du numéro atomique Z à partir du rapport des atténuations est réalisable avec des neutrons thermiques.

Éléments	Z	Att <sub>γ</sub> /Att <sub>N(rapides)</sub>
Be	4	0,357
C	6	0,881
Al	13	1,15
Cu	29	1,437
Cd	48	2,437
Pb	82	3,77

10 Tableau 2 : Rapport des atténuations pour quelques éléments connus avec des neutrons rapides et des photons de 3 MeV.

La figure 15 est un graphe construit avec les données du tableau 2. Ce graphe fait apparaître deux segments de droite dont le point d'intersection correspond à peu près à la séparation entre les éléments organiques (Z < 8) et inorganiques.

15 En conclusion, la production d'un faisceau de photons par rayonnement de freinage et d'un faisceau de neutrons par réaction photo nucléaire à partir d'un même accélérateur pulsé, permet la discrimination des matériaux organiques des matériaux inorganiques par exemple par la relation

$$\frac{Att_{\gamma}(E)}{Att_N(E)}$$

Revendications

1. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques en utilisant l'interaction de particules avec la matière, dans lequel les particules émises par un accélérateur source d'un côté de l'objet à inspecter sont transmises à travers ledit objet à des détecteurs situés de l'autre côté de l'objet pour élaborer au moins un signal de mesure

caractérisé en ce que

pour chaque zone examinée de l'objet, on effectue au moins une mesure révélatrice du nombre de particules ayant traversé l'objet,

on élaborer après la ou chaque mesure un signal représentatif du spectre des particules ayant traversé l'objet,

on intègre ces signaux pour obtenir une paire de valeurs d'intégration dont le rapport, pour chaque zone de l'objet, est représentatif du numéro atomique Z de l'élément principal constituant l'objet traversé par les particules et

on élaborer à partir de ces signaux une image sur laquelle la matière constituant l'objet traversé, ou une zone de celui-ci, et l'épaisseur ou la densité du corps constitué par cette matière sont indiquées par un code.

2. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 1, par un rayonnement électromagnétique (X ou  $\gamma$ ) à hautes énergies, caractérisé en ce que pour chaque zone examinée de l'objet on effectue successivement, à partir d'une source de rayonnement d'énergies élevées, deux mesures révélatrices du nombre de photons, ayant chaque fois traversé l'objet et de leur énergie, ces mesures étant toutes effectuées avec interposition d'un filtre respectif entre la source et l'objet à inspecter afin d'augmenter l'énergie des photons,

on élaborer après chaque mesure ledit signal représentatif du spectre des photons ayant traversé l'objet.

3. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 1, par un rayonnement électromagnétique (X ou  $\gamma$ ) à hautes énergies, caractérisé en ce que pour chaque zone examinée de l'objet, on effectue, à partir d'une source de rayonnement d'énergie élevée, une spectroscopie basse résolution du spectre du rayonnement issu de l'objet à inspecter pour déterminer le nombre de photons présentant des niveaux d'énergie supérieurs ou inférieur à un seuil d'énergie

et on compare les résultats afin de déterminer le numéro atomique Z effectif de la matière traversée.

4. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 3 caractérisé en ce que le seuil d'énergie de part et d'autre duquel on compte le photons ayant traversé l'objet à examiner est de 4 MeV.

5. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 1, caractérisé en ce que, pour chaque zone examinée de l'objet, on utilise un rayonnement électromagnétique (X ou  $\gamma$ ) à hautes énergies, et un rayonnement neutronique issus d'un même accélérateur pour effectuer simultanément, deux mesures, l'une révélatrice du nombre de photons, ayant chaque fois traversé l'objet et de leur énergie, et l'autre du nombre de neutrons ayant traversé l'objet, la neutrographie visualisant les matériaux de faible Z et la gammagraphie les matériaux de Z élevé.

6. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'afin d'augmenter le nombre de neutrons envoyés sur l'objet à inspecter, on interpose entre l'accélérateur et l'objet un filtre contenant du deutérium.

7. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 2 caractérisé en ce que le second filtre est constitué par du bore.

8. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 2 caractérisé en ce que le second filtre est constitué par 80 g/cm<sup>2</sup> de bore.

9. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon l'une quelconque de revendications 1 à 6 caractérisé en ce que le code utilisé pour caractériser la matière est un code de couleurs, chaque couleur étant spécifique d'une matière.

10. Procédé de discrimination de corps organiques et inorganiques selon l'ensemble des revendications 1 et 9, caractérisé en ce que le code utilisé pour caractériser l'épaisseur ou la densité est constitué par l'intensité de la couleur spécifique de la matière.

11. Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques pour la mise en œuvre du procédé selon les revendications 1 et 2, comprenant une source de particules de haute énergie, un dispositif de déplacement des objets à inspecter et un

système d'acquisition constitué par au moins une ligne de détecteurs destinés à interagir avec les particules ayant traversé l'objet à inspecter, caractérisé en ce qu'il comporte un système de filtration (2) destiné à interposer un filtre entre une source (1) de photons de haute énergie et l'objet (7) à inspecter, un dispositif informatique 5 de commande et de synchronisation (5) des systèmes de filtration (2) et d'acquisition (4) et un système de visualisation (6), le dispositif informatique (5) établissant, à partir des signaux d'au moins deux mesures effectuées avec des filtres différents, le numéro atomique Z de la matière traversée dans les différentes zones de l'objet (7) et élaborant une image de l'objet en affectant un code à ces zones selon leur nature 10 organique ou inorganique.

12. Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la revendication 10, caractérisé en ce que le système de filtration (2) est constitué par un cylindre rotatif comportant plusieurs secteurs composés d'une matière filtrante.

13. Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques selon 15 l'ensemble des revendications 11 et 12, caractérisé en ce que l'axe de rotation du cylindre est disposé parallèlement au rayonnement issu de la source pour interposer, dans une position de rotation, chaque fois un filtre particulier dans ledit rayonnement.

14. Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques selon 20 l'ensemble des revendications 11 et 12, caractérisé en ce que l'axe de rotation du cylindre est disposé perpendiculairement au rayonnement issu de la source pour interposer, dans une position de rotation, chaque fois une paire de filtres particuliers dans ledit rayonnement.

15. Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques selon la 25 revendication 11, caractérisé en ce que le système de filtration (2) est constitué par des lames de matière filtrante vibrant à une fréquence déterminée par le système informatique (5) pour s'interposer ou non dans le rayonnement issu de la source.

16. Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques pour la mise en œuvre du procédé selon la revendication 3, comprenant une source de 30 particules de haute énergie, un dispositif de déplacement des objets à inspecter et un système d'acquisition constitué par au moins une ligne de détecteurs destinés à interagir avec les particules ayant traversé l'objet à inspecter, caractérisé en ce que chaque détecteur de la ligne de détecteurs est constituée par une matrice de

détecteurs élémentaires dont la taille permet de réduire le taux de comptage des photons qu'il comporte un système informatique d'acquisition et un système de visualisation le dispositif informatique (5) établissant, à partir des signaux issus des détecteurs élémentaires, le numéro atomique Z de la matière traversée dans les 5 différentes zones de l'objet et élaborant une image de l'objet en affectant un code à ces zones selon leur nature organique ou inorganique.

17. Dispositif de discrimination de corps organiques et inorganiques pour la mise en œuvre du procédé selon les revendication 5 et 6, comprenant une source de particules de haute énergie, photons X et neutrons, un dispositif de déplacement des 10 objets à inspecter et un système d'acquisition constitué par au moins une ligne de détecteurs destinés à interagir avec les particules ayant traversé l'objet à inspecter, caractérisé en ce qu'il comporte une première ligne de détecteurs (1) destinée à détecter des photons ayant traversé l'objet à inspecter, suivie d'une électronique d'évaluation (3) pour traiter le signal issu des détecteurs correspondant au nombre de 15 photon, une deuxième ligne de détecteurs (2) destinée à détecter des neutrons ayant traversé l'objet à inspecter, suivie d'une électronique d'évaluation (4) pour traiter le signal issu des détecteurs correspondant au nombre de neutrons, un dispositif informatique (5) pour comparer ces nombres et un système de visualisation, le dispositif informatique (5) établissant, à partir des signaux le numéro atomique Z de 20 la matière traversée dans les différentes zones de l'objet et élaborant une image de l'objet en affectant un code à ces zones selon leur nature organique ou inorganique.

18. Dispositif de discrimination de corps organiques selon la revendication 17, caractérisé en ce qu'un système de filtration comportant du deutérium est interposé entre la source de neutrons et l'objet à inspecter.

1/5

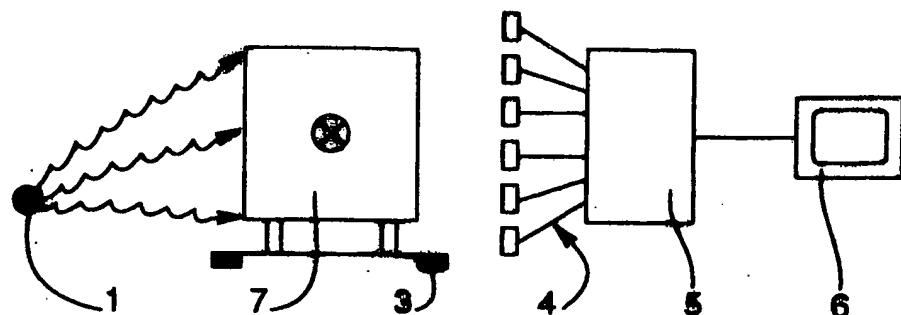


FIG. 1

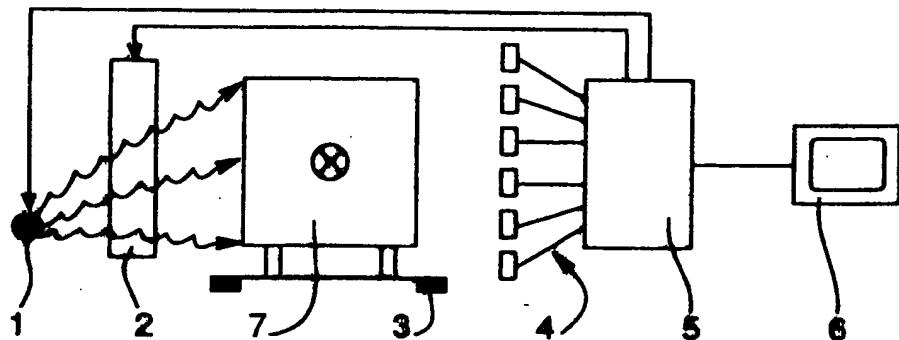


FIG. 2

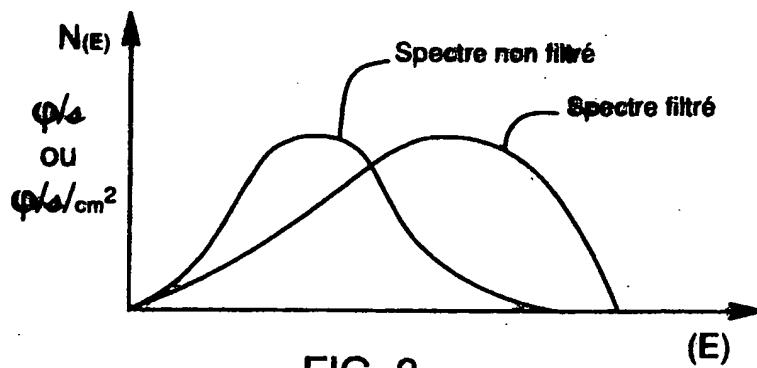


FIG. 3

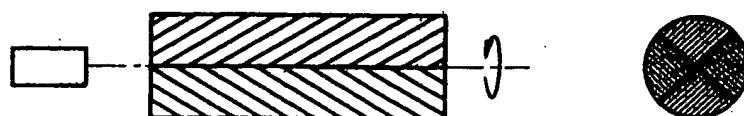


FIG. 4

FEUILLE DE REMPLACEMENT (REGLE 26)

2/5

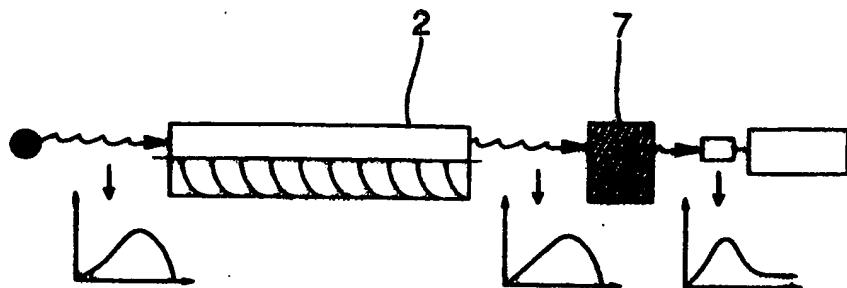


FIG. 5a

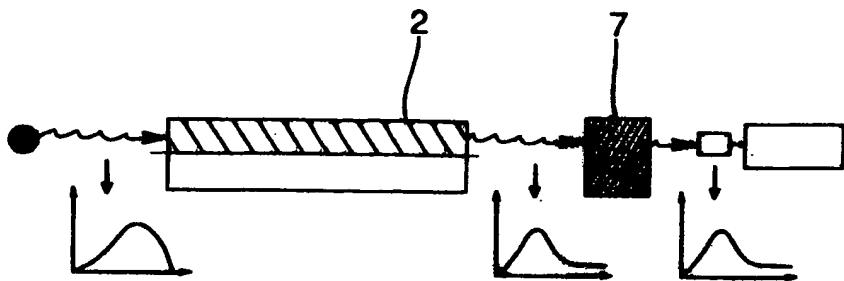


FIG. 5b

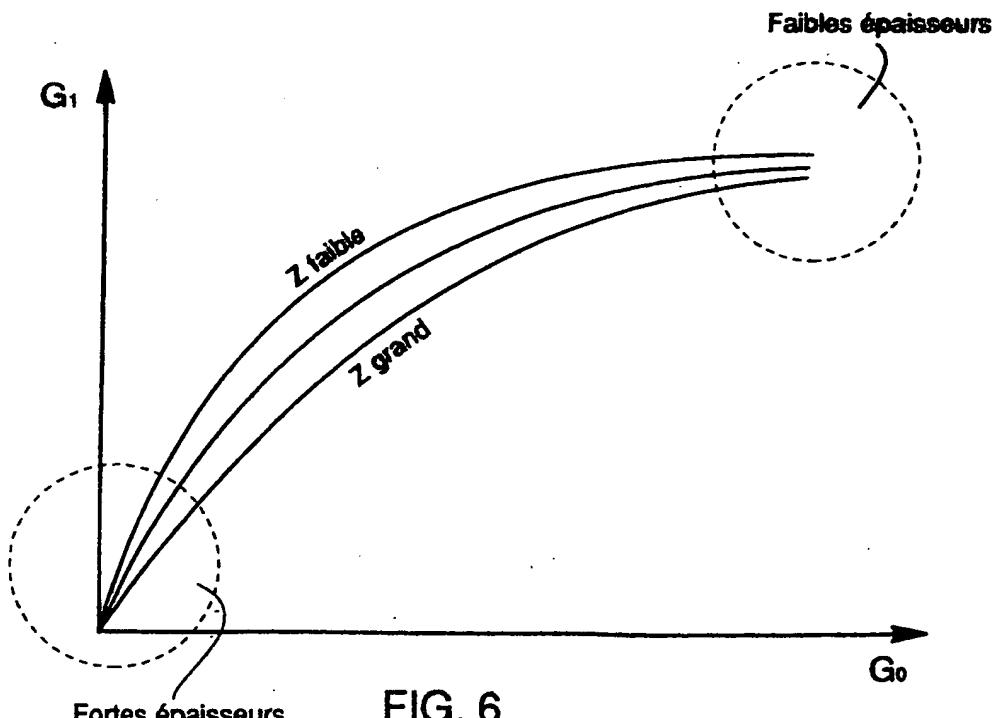


FIG. 6

3/5

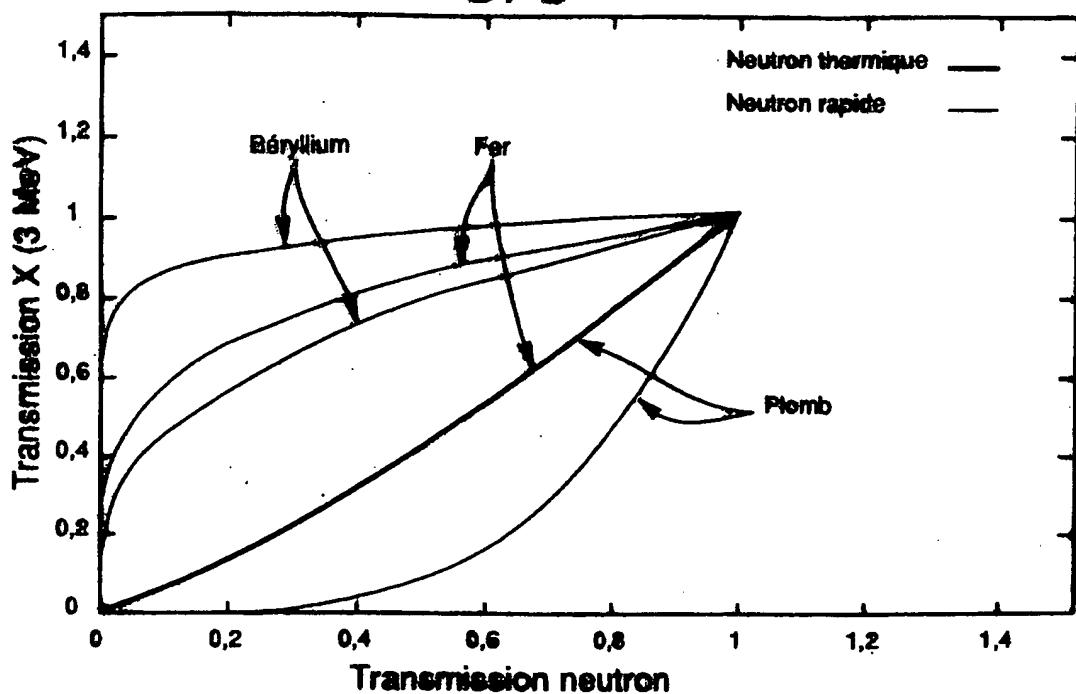


FIG. 7

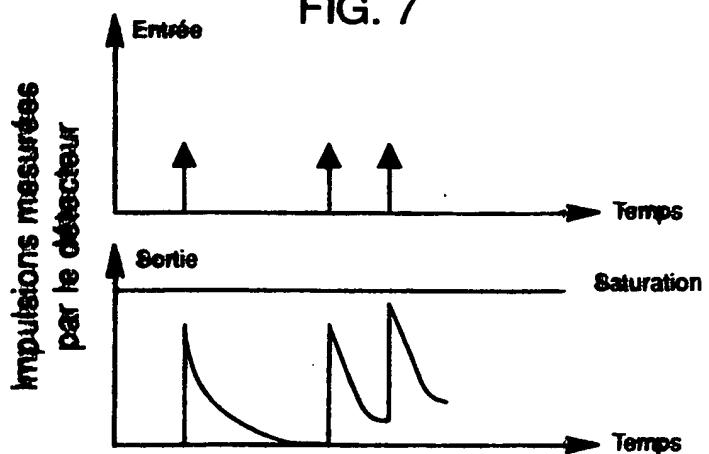


FIG. 8

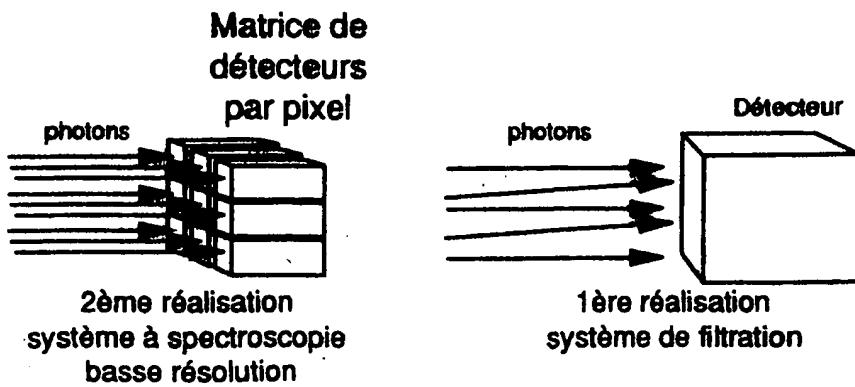


FIG. 9

4/5



FIG. 10

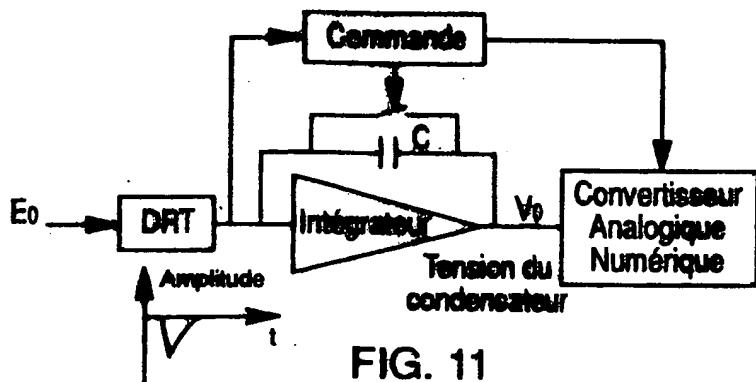


FIG. 11

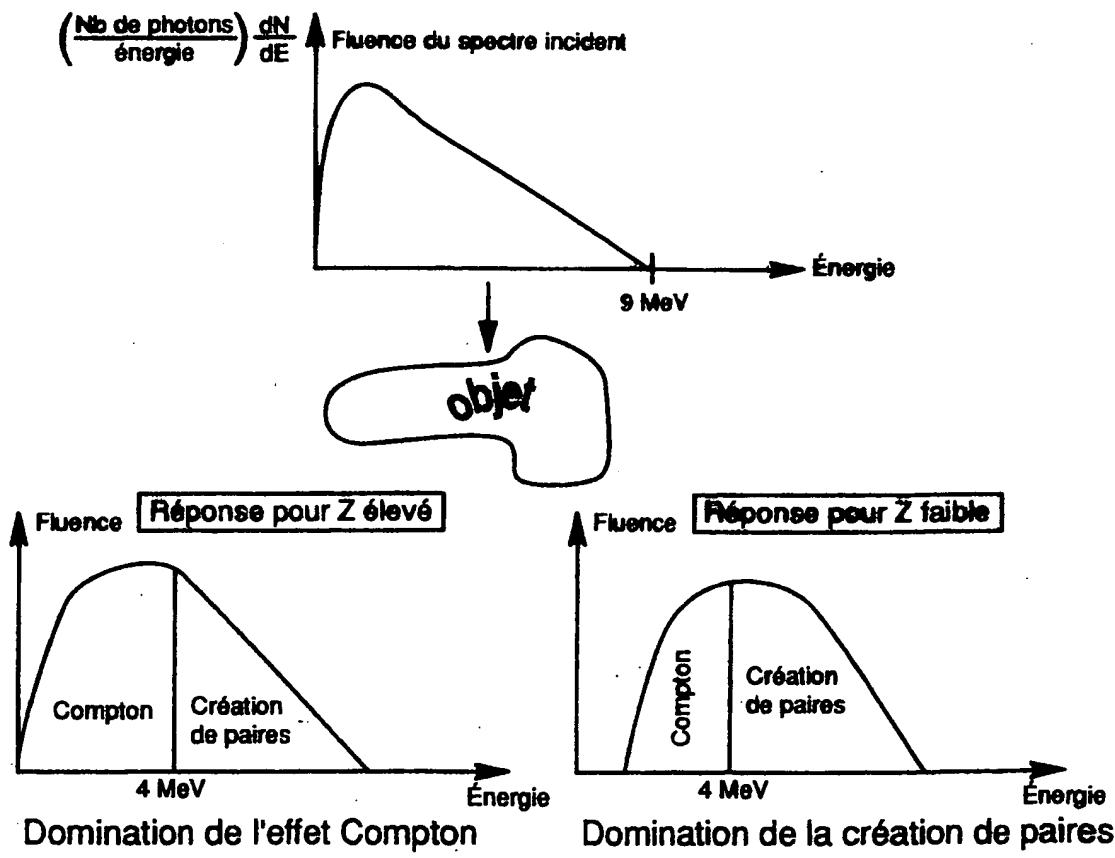


FIG. 12

5/5

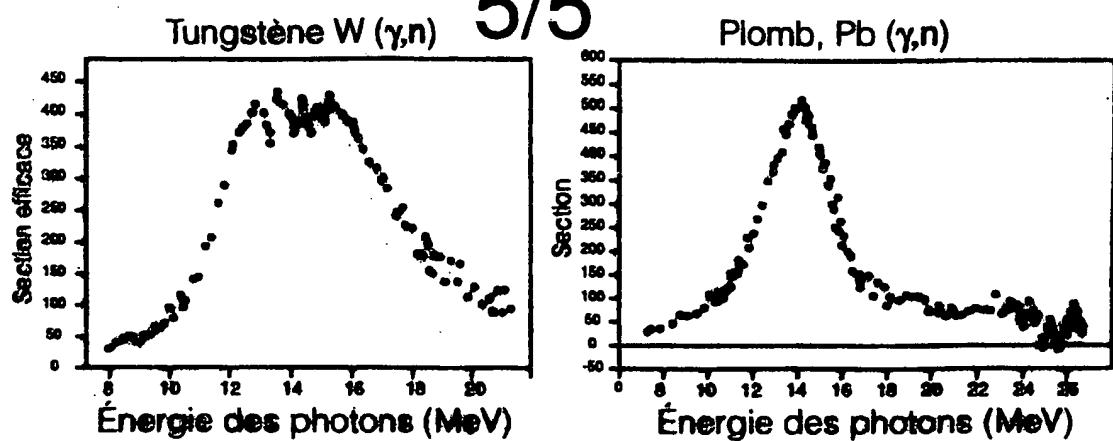


FIG. 13

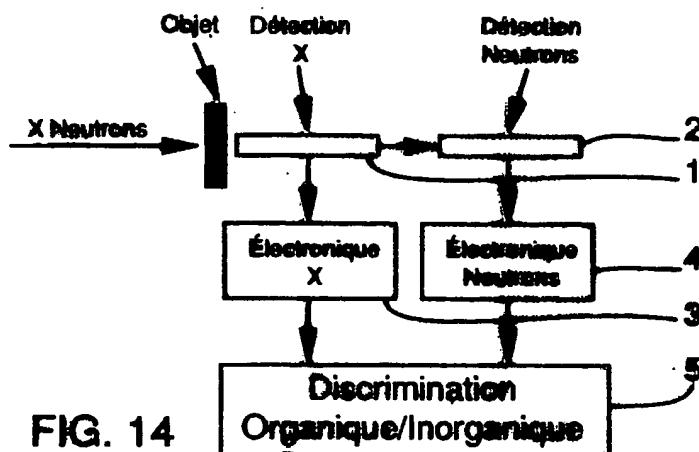
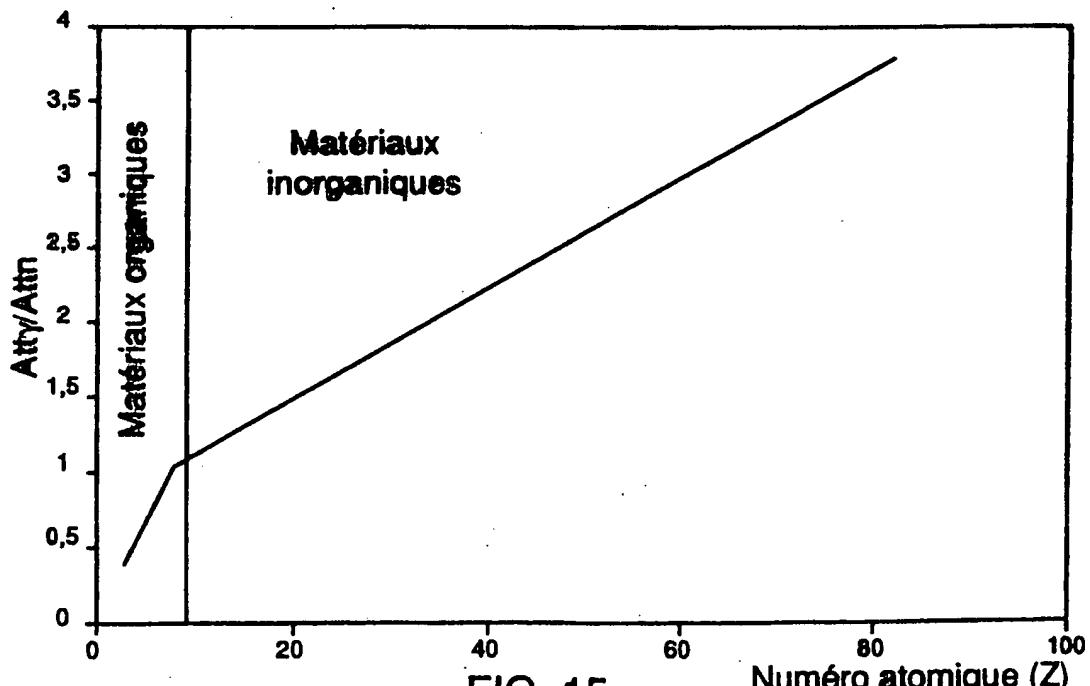


FIG. 14

FIG. 15  
FEUILLE DE REMPLACEMENT (REGLE 26)